

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/051061

International filing date: 09 March 2005 (09.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: IT  
Number: MI2004A 000446  
Filing date: 09 March 2004 (09.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 13 June 2005 (13.06.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

PCT/EP 2005 / 05 1 0 6 1  
EPO - DG 1



17. 5. 2005

(51)

# Ministero delle Attività Produttive

*Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività*

*Ufficio Italiano Brevetti e Marchi*

*Ufficio G2*



**Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per:  
INVENZIONE INDUSTRIALE N. MI 2004 A 000446**

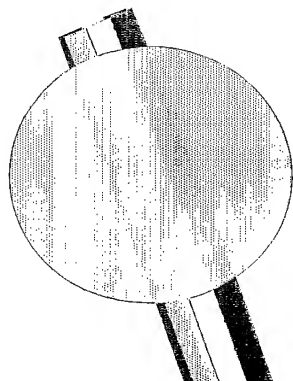
Si dichiara che l'unità copia è conforme ai documenti originali  
depositati con la domanda di brevetto sopra specificata, i cui dati  
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.

Roma, li..... 17 & 05 2005

IL FUNZIONARIO

*Giampietro Carlotta*

*Giampietro Carlotta*

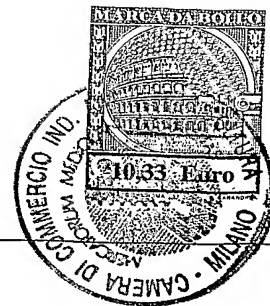


# MODULO A (1/2)

AL MINISTERO DELL'INDUSTRIA DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI (U.I.B.M.)

DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE N°

MI 2004 A 0 0 0 4 4 6



## A. RICHIEDENTE/I

COGNOME E NOME O DENOMINAZIONE	A1	MARCONI COMMUNICATIONS S.P.A.		
NATURA GIURIDICA (PF/PG)	A2	PG	COD. FISCALE PARTITA IVA	A3 01168770996
INDIRIZZO COMPLETO	A4	GENOVA		
COGNOME E NOME O DENOMINAZIONE	A1			
NATURA GIURIDICA (PF/PG)	A2		COD. FISCALE PARTITA IVA	A3
INDIRIZZO COMPLETO	A4			
<b>B. RECAPITO OBBLIGATORIO IN MANCANZA DI MANDATARIO</b>	B0	(D = DOMICILIO ELETTIVO, R = RAPPRESENTANTE)		
COGNOME E NOME O DENOMINAZIONE	B1			
INDIRIZZO	B2			
CAP/LOCALITÀ/PROVINCIA	B3			
<b>C. TITOLO</b>	C1	"SISTEMA, METODO E APPARATO PER LA COMPENSAZIONE DELLA PMD E CONTEMPORANEA DEMULTIPLAZIONE DI COPPIE DI SEGNALI MULTIPLATI IN POLARIZZAZIONE "		

## D. INVENTORE/I DESIGNATO/I (DA INDICARE ANCHE SE L'INVENTORE COINCIDE CON IL RICHIEDENTE)

COGNOME E NOME	D1	SECONDINI MARCO
NAZIONALITÀ	D2	ITALIANA
COGNOME E NOME	D1	COLAVOLPE GIULIO
NAZIONALITÀ	D2	ITALIANA
COGNOME E NOME	D1	FORESTIERI ENRICO
NAZIONALITÀ	D2	ITALIANA
COGNOME E NOME	D1	PRATI GIANCARLO
NAZIONALITÀ	D2	ITALIANA

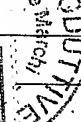
## E. CLASSE PROPOSTA

SEZIONE	CLASSE	SOTTOCLASSE	GRUPPO	SOTTOGRUPPO
E1	E2	E3	E4	E5

## F. PRIORITA'

DERIVANTE DA PRECEDENTE DEPOSITO ESEGUITO ALL'ESTERO

STATO O ORGANIZZAZIONE	F1		TIPO	F2	
NUMERO DI DOMANDA	F3		DATA DEPOSITO	F4	
STATO O ORGANIZZAZIONE	F1		TIPO	F2	
NUMERO DI DOMANDA	F3		DATA DEPOSITO	F4	
<b>G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA COLTURE DI MICROORGANISMI</b>	G1				
FIRMA DEL/DEI RICHIEDENTE/I	P.I. INGG. GUZZI & RAVIZZA - DR. ING. VITTORIO FARAGGIANA PER SÉ E PER GLI ALTRI				



# MODULO A (2/2)

## I. MANDATARIO DEL RICHIEDENTE PRESSO L'UIBM

LA/E SOTTOINDICATA/E PERSONA/E HA/HANNO ASSUNTO IL MANDATO A RAPPRESENTARE IL TITOLARE DELLA PRESENTE DOMANDA INNANZI ALL'UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI CON L'INCARICO DI EFFETTUARE TUTTI GLI ATTI AD ESSA CONNESSI (DPR 20.10.1998 N. 403).

NUMERO ISCRIZIONE ALBO COGNOME E NOME;	I1	169 VITTORIO FARAGGIANA ED ALTRI
DENOMINAZIONE STUDIO	I2	INGG. GUZZI & RAVIZZA SRL
INDIRIZZO	I3	VIA VINCENZO MONTI, 8
CAP/LOCALITÀ/PROVINCIA	I4	20123 MILANO
L. ANNOTAZIONI SPECIALI	L1	

## M. DOCUMENTAZIONE ALLEGATA O CON RISERVA DI PRESENTAZIONE

TIPO DOCUMENTO	N. ES. ALL.	N. ES. RIS.	N. PAG. PER ESEMPLARE
PROSPETTO A, DESCRIZ., RIVENDICAZ. (OBBLIGATORI 2 ESEMPLARI)	2		22
DISEGNI (OBBLIGATORI SE CITATI IN DESCRIZIONE, 2 ESEMPLARI)	2		3
DESIGNAZIONE D'INVENTORE			
DOCUMENTI DI PRIORITÀ CON TRADUZIONE IN ITALIANO			
AUTORIZZAZIONE O ATTO DI CESSIONE			
	(SI/NO)		
LETTERA D'INCARICO	NO		
PROCURA GENERALE			
RIFERIMENTO A PROCURA GENERALE			
	(EURO)	IMPORTO VERSATO ESPRESSO IN LETTERE	
ATTESTATI DI VERSAMENTO	291,80	DUECENTONOVANTUNO/80	
FOGLIO AGGIUNTIVO PER I SEGUENTI PARAGRAFI (BARRARE I PRESCELTI) DEL PRESENTE ATTO SI CHIEDE COPIA AUTENTICA? (SI/NO)	A	D	F
SI CONCEDE ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO? (SI/NO)	SI		
	NO		
DATA DI COMPILAZIONE	09.03.2004		
FIRMA DEL/DEI RICHIEDENTE/I	P.I. INGG. GUZZI & RAVIZZA DR. ING. VITTORIO FARAGGIANA PER SÉ E PER GLI ALTRI		

## VERBALE DI DEPOSITO

NUMERO DI DOMANDA	MI 2004 A 0 0 0 4 4 6		
C.C.I.A.A. DI	MILANO		COD. 15
IN DATA	09 MAR. 2004.	IL/I RICHIEDENTE/I SOPRAINDICATO/I HA/HANNO PRESENTATO A ME	
LA PRESENTE DOMANDA CORREDATA DI N.	00	FOGLI AGGIUNTIVI PER LA CONCESSIONE DEL BREVETTO SOPRARIPORTATO.	
N. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIALE ROGANTE			
IL DEPOSITANTE	L'UFFICIALE ROGANTE		
	CORTONESI MAURIZIO		



**PROSPETTO MODULO A**  
**DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE**

<b>NUMERO DI DOMANDA:</b>	<b>MI 2004 A 0 0 0 4 4 6</b>	<b>DATA DI DEPOSITO:</b>	<b>0 9 MAR. 2004</b>
<b>A. RICHIEDENTE/I</b> COGNOME E NOME O DENOMINAZIONE, RESIDENZA O STATO			
Marconi Communications S.p.A. Genova			
<b>C. TITOLO</b>			
"SISTEMA, METODO E APPARATO PER LA COMPENSAZIONE DELLA PMD E CONTEMPORANEA DEMULTIPLAZIONE DI COPPIE DI SEGNALI MULTIPLATI IN POLARIZZAZIONE "			

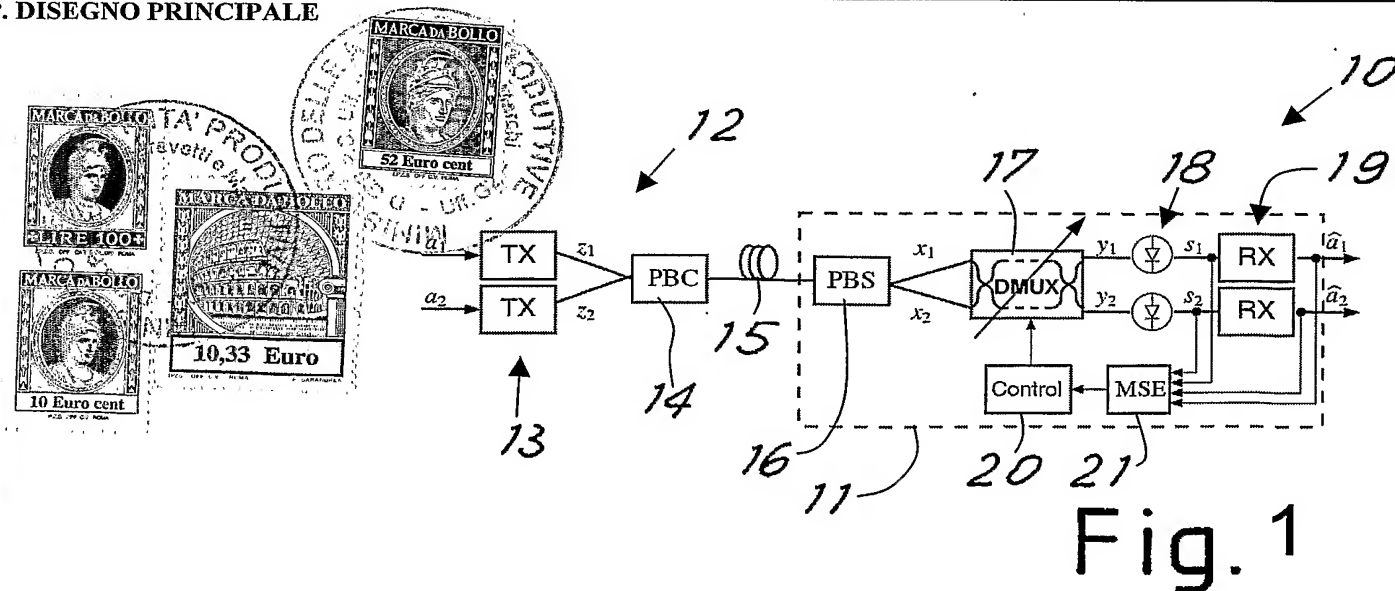
SEZIONE	CLASSE	SOTTOCLASSE	GRUPPO	SOTTOGRUPPO

**E. CLASSE PROPOSTA**

**O. RIASSUNTO**

Un sistema di trasmissione comprendente due segnali ottici che vengono trasmessi lungo una stessa fibra a stessa lunghezza d'onda ma con polarizzazione ortogonale, comprende un apparato ricevente in grado di filtrare le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una opportuna matrice di trasferimento che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando gli effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.

**P. DISEGNO PRINCIPALE**



FIRMA DEL/DEI  
RICHIEDENTE/I

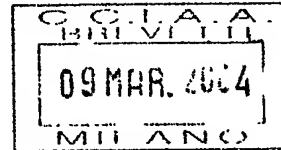
P.I. INGG. GUZZI & RAVIZZA / DR. ING. VITTORIO FARAGGIANA PER SÉ E PER GLI ALTRI

"Sistema, metodo e apparato per la compensazione della PMD e contemporanea demultiplazione di coppie di segnali multiplati in polarizzazione"

titolare: Marconi Communications S.p.A.

con sede in: Genova

\*\*\*\*\*



La presente invenzione si riferisce al campo delle tecniche di demodulazione per sistemi di comunicazione ottici, con particolare riferimento, ma non limitatamente, alla multiplazione di polarizzazione.

La multiplazione di polarizzazione (detta "PolMUX") consente di trasmettere in una stessa fibra due segnali ottici alla stessa lunghezza d'onda polarizzati ortogonalmente. In tal modo è possibile raddoppiare la quantità di dati trasmessi nell'unità di tempo, a parità di banda occupata.

Con riferimento ad un sistema a multiplazione di lunghezza d'onda (in inglese "wavelength division multiplexing", WDM), la tecnica può essere vista equivalentemente in due diversi modi: un sistema di trasmissione a 4 livelli, che consente di raddoppiare la quantità di dati trasmessi per ciascun canale senza variare la velocità di simbolo, o un metodo per raddoppiare il numero di canali WDM senza variare la spaziatura in lunghezza d'onda.

La tecnica PolMUX, benché promettente, presenta notevoli difficoltà pratiche. Ad esempio, è noto che un segnale ottico trasmesso in fibra subisce una rotazione casuale e tempo variante della polarizzazione. Tale fenomeno, pur mantenendo l'ortogonalità tra i due segnali multiplati in polarizzazione, ne altera in modo arbitrario l'orientamento con il quale giungono al ricevitore, rendendone impossibile la separazione senza un adeguata tecnica di recupero dinamico della polarizzazione stessa (in inglese "polarization tracking").

MI 2004 A 0 0 0 4 4 6

Inoltre, nel caso di trasmissioni ad alta velocità di simbolo, si ha l'ulteriore problema della dispersione modale di polarizzazione (PMD), che allarga, distorce e depolarizza gli impulsi trasmessi, provocando un notevole deterioramento della qualità del segnale ricevuto e rendendo inoltre possibile l'interferenza ed il mescolamento dei due segnali originariamente ortogonali in polarizzazione.

Scopo generale della presente invenzione è ovviare agli inconvenienti sopra menzionati fornendo un innovativo sistema che permetta contemporanea compensazione della PMD e demultiplazione dei segnali multiplati in polarizzazione a uguale lunghezza d'onda.

In vista di tale scopo si è pensato di realizzare, secondo l'invenzione, un sistema di trasmissione comprendente due segnali ottici che vengono trasmessi lungo una stessa fibra a stessa lunghezza d'onda ma con polarizzazione ortogonale, comprendente un apparato ricevente in grado di filtrare le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una matrice di trasferimento  $H(\omega)$  che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.

Sempre secondo l'invenzione, si è anche pensato di realizzare un metodo di trasmissione comprendente due segnali ottici che vengono trasmessi lungo una stessa fibra a stessa lunghezza d'onda ma con polarizzazione ortogonale, e che al lato ricevente filtra le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una matrice di trasferimento  $H(\omega)$  che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento

inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.

Sempre secondo l'invenzione, si è anche pensato di realizzare anche un apparato per ricevere un segnale ottico, che è stato trasmesso lungo una fibra e che è composto da due segnali multiplati in polarizzazione, e per eseguire una compensazione della PMD e la contemporanea demultiplazione dei due segnali, comprendente mezzi che filtrano le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una matrice di trasferimento  $H(\omega)$  che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.

Per rendere più chiara la spiegazione dei principi innovativi della presente invenzione ed i suoi vantaggi rispetto alla tecnica nota si descriverà di seguito, con l'aiuto dei disegni allegati, una possibile realizzazione esemplificativa applicante tali principi. Nei disegni:

-figura 1 rappresenta uno schema a blocchi di un sistema a multiplazione di polarizzazione che utilizza la presente invenzione;

-figura 2 rappresenta una schematizzazione funzionale dell'apparato di demultiplazione DMUX di figura 1 come combinazione di filtri trasversali a coefficienti complessi;

-figura 3 rappresenta schematicamente una possibile implementazione dell'apparato



DMUX di figura 2 mediante circuiti ottici planari PLC;

-figura 4 rappresenta una ulteriore possibile implementazione del DMUX di figura 2 impiegando controllori di polarizzazione (PC) e fibre a mantenimento (PMF);

-figura 5 rappresenta lo schema a blocchi con le funzioni di trasferimento alle quali sono sottoposti i segnali nel sistema di figura 1;

-figura 6 rappresenta graficamente un esempio del funzionamento del dispositivo secondo l'invenzione;

-figura 7 rappresenta graficamente una stima quantitativa delle prestazioni del sistema secondo l'invenzione.

Con riferimento alle figure, in figura 1 è riportata uno schema che descrive un sistema di trasmissione a moltiplicazione di polarizzazione (indicato schematicamente con 10) che utilizza la presente invenzione. In particolare, nel rettangolo tratteggiato 11 è mostrato lo stadio di ricezione secondo l'invenzione.

Al lato trasmittente 12, due segnali  $a_1$  e  $a_2$  vengono applicati a due noti trasmettitori TX 13 che producono segnali ottici  $z_1$  e  $z_2$  alla stessa lunghezza d'onda. I due segnali ottici vengono accoppiati per mezzo di un noto accoppiatore di polarizzazione (Polarization Beam Combiner=PBC) 14 e trasmessi sulla fibra 15 su polarizzazioni ortogonali.

Nel ricevitore 11, il segnale ricevuto, dato dalla combinazione dei due segnali di ingresso alterati dalla propagazione in fibra, viene separato in due componenti ortogonali da un noto divisore di polarizzazione (Polarization Beam Splitter=PBS) 16. Deve essere notato che nessuna importanza ha l'orientamento degli assi del PBS, che è fisso e solidale col ricevitore.

Le due componenti  $x_1$  e  $x_2$  separate sono inviate alle due porte di ingresso di un dispositivo DMUX 17 (che verrà descritto in maggiore dettaglio nel seguito) e da



esso filtrate opportunamente, ottenendo le due componenti  $y_1$  e  $y_2$  sulle porte di uscita.

Con l'opportuno funzionamento del sistema, le due componenti di uscita  $y_1$  e  $y_2$  corrispondono ai due segnali trasmessi  $z_1$  e  $z_2$ , opportunamente equalizzati e demultiplati per compensare gli effetti della propagazione in fibra.

Le componenti  $y_1$  e  $y_2$  possono a questo punto essere fotorivelate da fotorivelatori 18 e i segnali  $s_1$  e  $s_2$  così ottenuti possono venire inviati a dei normali noti ricevitori 19 all'uscita dei quali si ottengono segnali  $\hat{a}_1$  e  $\hat{a}_2$  corrispondenti ai segnali di partenza  $a_1$  e  $a_2$ .

In particolare, i ricevitori 19 per i due canali possono essere completamente separati o condividere alcuni elementi, quali il circuito di recupero del clock.

Come sarà chiaro nel seguito, il dispositivo DMUX viene vantaggiosamente controllato in maniera adattiva, aggiornando continuamente il valore dei suoi parametri di controllo sulla base del valore di un segnale di retroazione. Ciò è ottenuto grazie ad un circuito di controllo 20 che riceve il segnale di retroazione da un blocco 21, il quale calcola tale segnale in base a caratteristiche dei segnali in uscita. Si vedrà nel seguito una vantaggiosa scelta per la realizzazione di tale retroazione.

In figura 2 è riportata una schematizzazione funzionale dell'apparato di demultiplazione DMUX 17 mediante una combinazione di filtri trasversali a coefficienti complessi, che nel seguito indicheremo come filtro trasversale bidimensionale. L'apparato ha una funzione di trasferimento:

$$H(\omega) = e^{-j\frac{N}{2}\omega\tau} \begin{pmatrix} C(\omega) & D(\omega) \\ -D(\omega)^* & C(\omega)^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

Le due funzioni  $C(\omega)$  e  $D(\omega)$  possono essere rappresentate mediante la loro espansione in serie di Fourier ( $N+1$  termini):

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^N c_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (2)$$

$$D(\omega) = \sum_{k=0}^N d_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (3)$$

dove  $c_k$  e  $d_k$  sono dei coefficienti complessi. E' noto che tali filtri hanno funzioni di trasferimento periodiche, con periodo  $1/\tau$ , il cui andamento può essere controllato variando opportunamente i coefficienti. Gli unici limiti sono posti dalla periodicità delle funzioni di trasferimento stesse e dal numero finito  $N+1$  di armoniche che le rappresentano. Inoltre, per avere una matrice di trasferimento unitaria, è presente l'ulteriore vincolo:

$$|C(\omega)|^2 + |D(\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

In figura 3 è riportata una rappresentazione schematica di una possibile implementazione dell'apparato DMUX 17 mediante un dispositivo ottico planare integrato (PLC). Esso è un dispositivo a 4 porte, costituito da una cascata di  $N$  elementi identici, ognuno comprendente una nota struttura interferometrica <sup>21</sup> con ritardo  $\tau$  tra i due cammini ottici, un noto modulatore di fase <sup>22</sup> controllato dal parametro  $\phi_n$  e un noto accoppiatore variabile <sup>23</sup> controllato dal parametro  $\theta_n$ . All'ingresso del dispositivo è presente un ulteriore accoppiatore variabile  $\theta_0$ . Ognuno degli accoppiatori variabili è realizzato, come facilmente immaginabile dal tecnico esperto, mediante un'ulteriore struttura interferometrica tipo Mach-Zender. Il numero totale di parametri controllabili è  $Q=2N+1$ , pari al numero di gradi di libertà del dispositivo. E' altresì possibile che alcuni o tutti gli  $N$  elementi del dispositivo siano costituiti da un numero maggiore di modulatori di fase <sup>22</sup> e accoppiatori variabili <sup>23</sup>, aumentando il numero di gradi di libertà del dispositivo per consentirne un miglior funzionamento dinamico. La matrice di trasferimento complessiva può essere

calcolata moltiplicando le matrici di trasferimento dei singoli elementi. In particolare, omettendo un inessenziale termine di fase e di ritardo, le matrici di trasferimento dell'accoppiatore variabile, del modulatore di fase e della linea di ritardo sono rispettivamente:

$$\begin{aligned} H_{\theta n} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -j \sin \theta_n \\ -j \sin \theta_n & \cos \theta_n \end{pmatrix} \\ H_{\phi n} &= \begin{pmatrix} e^{j\phi_n/2} & 0 \\ 0 & e^{-j\phi_n/2} \end{pmatrix} \\ H_{\tau}(\omega) &= \begin{pmatrix} e^{-j\omega\tau/2} & 0 \\ 0 & e^{j\omega\tau/2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Pertanto, la matrice di trasferimento complessiva è:

$$H(\omega) = \left[ \prod_{n=N}^1 (H_{\theta n} H_{\phi n} H_{\tau}(\omega)) \right] H_{\theta 0} \quad (6)$$

Si può dimostrare che la (6) è una matrice di trasferimento unitaria dipendente dalla frequenza, che può essere scritta nella stessa forma indicata dalle equazioni (1)-(4). Pertanto il dispositivo PLC realizza le funzionalità richieste all'apparato DMUX 17. Nella pratica occorrerà tener conto del fatto che i parametri di controllo non saranno direttamente i coefficienti complessi del filtro trasversale, ma i Q parametri del PLC, ad essi legati non linearmente. Ciò non costituirà comunque un problema per la realizzabilità della presente invenzione.

In figura 4 è invece riportata la descrizione di un'ulteriore possibile implementazione dell'apparato DMUX 17, mediante controllori di polarizzazione (PC) e fibre a mantenimento di polarizzazione (PMF).

Da un punto di vista sistemistico, la descrizione di tale dispositivo è identica a quella del dispositivo PLC di figura 3. Le precedenti equazioni (5) e (6) e le conseguenze che ne derivano sono quindi ugualmente valide, considerando che alla separazione

spaziale dei segnali di ingresso e uscita del PLC corrisponde, in questo caso, una separazione in polarizzazione, e che il PBS presente all'ingresso dell'apparato DMUX in figura 1 deve essere spostato all'uscita dell'apparato medesimo.

Il principio di funzionamento dell'apparato DMUX 17 si basa sulla controllabilità della sua matrice di trasferimento. Nell'ipotesi di scegliere un valore di  $\tau$  sufficientemente piccolo (metà del tempo di bit è un valore ragionevole) e di avere un numero di stadi  $N$  sufficientemente grande (4 stadi, ad esempio), il dispositivo è in grado di approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale.

In tal modo, i due segnali di uscita sono sostanzialmente una replica (approssimata) dei segnali trasmessi.

Facendo riferimento allo schema a blocchi in figura 5, i vettori:

$$\begin{pmatrix} Z_1(\omega) \\ Z_2(\omega) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} Y_1(\omega) \\ Y_2(\omega) \end{pmatrix} \quad (7)$$

rappresentano, nel dominio della frequenza, rispettivamente, le coppie di segnali  $z_1$  e  $z_2$  all'ingresso della fibra,  $x_1$  e  $x_2$  all'uscita della fibra e  $y_1$  e  $y_2$  all'uscita del DMUX.

Si possono dunque scrivere le relazioni:

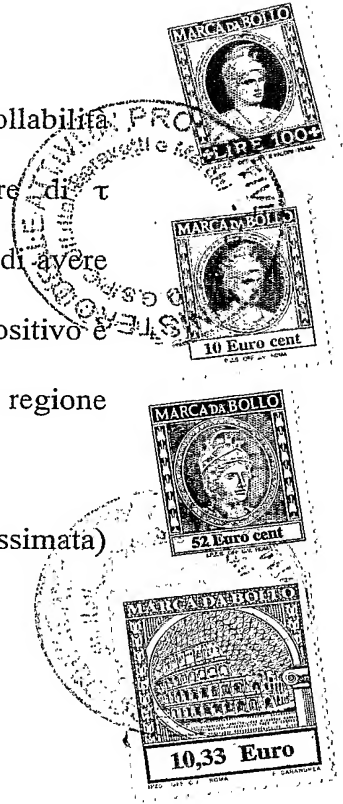
$$\begin{pmatrix} Y_1(\omega) \\ Y_2(\omega) \end{pmatrix} = H(\omega) \begin{pmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \end{pmatrix} \quad (8)$$

e

$$\begin{pmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \end{pmatrix} = U(\omega) \begin{pmatrix} Z_1(\omega) \\ Z_2(\omega) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Nell'equazione (9),  $U(\omega)$  rappresenta la matrice di Jones della fibra e tiene conto degli effetti di rotazione e PMD, con un sistema di riferimento che in ingresso è allineato agli assi del PBC e in uscita a quelli del PBS.

Nell'ipotesi suddetta, in cui il dispositivo approssima la matrice di trasferimento



inversa della fibra, scriveremo:

$$H(\omega) \cong U^{-1}(\omega) \quad (10)$$

e varrà la relazione

$$\begin{pmatrix} Y_1(\omega) \\ Y_2(\omega) \end{pmatrix} = H(\omega) U(\omega) \begin{pmatrix} Z_1(\omega) \\ Z_2(\omega) \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} Z_1(\omega) \\ Z_2(\omega) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Dall'equazione (11) risulta che i due segnali  $y_1$  e  $y_2$  all'uscita del dispositivo sono approssimativamente una replica dei due segnali trasmessi. Ne consegue che, fotorivelando e inviando tali segnali al rispettivo ricevitore 19, le due sequenze di simboli ricevuti  $\hat{a}_1$  e  $\hat{a}_2$  coincidono con le sequenze di simboli trasmesse  $a_1$  e  $a_2$ .

Un esempio del funzionamento del DMUX è schematicamente riportato in figura 6. A scopo esemplificativo, nella figura 6 si considera il caso di una trasmissione PolMUX su una fibra affetta da PMD. Sono riportati i diagrammi ad occhio per entrambi i canali ricevuti, originariamente multiplati in polarizzazione ortogonale sulla stessa banda di frequenza, prima e dopo il DMUX.

Dal confronto dei diagrammi ad occhio riportati per ingresso e uscita risulta evidente che la distorsione e la mutua interferenza presenti a monte del DMUX a causa della PMD, risultano totalmente eliminati a valle del DMUX stesso.

Le prestazioni ottenibili per mezzo del sistema di trasmissione secondo l'invenzione possono essere date in termini di penalizzazione del rapporto segnale-rumore ottico (OSNR) e probabilità di fuori servizio (OP=Outage Probability). Un sistema OOK standard è considerato a scopo di comparazione. La penalizzazione OSNR è riferita ad un sistema OOK in una configurazione "back-to-back" per un BER di  $10^{-12}$ . L'OP è la probabilità che la penalizzazione OSNR diventi maggiore di 3 dB.

Una stima quantitativa delle prestazioni del sistema è mostrata nel diagramma di figura 7, in cui è riportata la probabilità di fuori-servizio in funzione del DGD medio del collegamento, che è un parametro caratterizzante il comportamento statistico di

una fibra in termini di PMD.

Nel diagramma uno dei due canali (hanno la medesima probabilità di fuori servizio) di un sistema PolMUX con DMUX a 4 stadi è confrontato sia con un normale e noto sistema OOK non compensato, sia con lo stesso sistema OOK con compensazione esatta della PMD del primo ordine.

Come si vede, il canale PolMUX ottenuto secondo l'invenzione risulta avere prestazioni decisamente migliori, mostrando che il dispositivo dell'invenzione è effettivamente in grado di demultiplexare i due canali ed eseguire una compensazione della PMD, anche per ordini superiori al primo. In particolare, il sistema proposto può operare con DGD medi fino a  $0.42T_b$ , mantenendo una OP inferiore a  $10^{-6}$ . Come sopra accennato è vantaggioso e preferibile secondo l'invenzione che, durante il normale funzionamento del sistema, i parametri del DMUX vengano aggiornati dinamicamente, in modo da seguire le variazioni temporali del canale di trasmissione, che si traducono in variazioni della matrice di trasferimento della fibra.

Allo scopo, è stato trovato necessario utilizzare un segnale di retroazione che sia un buon indicatore della qualità dei segnali ricevuti, cioè del tasso d'errore corrispondente.

Nella presente invenzione si fa vantaggiosamente riferimento ad un segnale di retroazione che è una stima dell'errore quadratico medio (MSE) complessivo sui due segnali ricevuti  $s_1$ ,  $s_2$  (la somma o, equivalentemente, il valor medio degli MSE di ciascuno dei due segnali). Ciò è ottenuto dal blocco di calcolo 21.

Sempre secondo l'invenzione, per controllare il DMUX è anche possibile utilizzare con vantaggio altri segnali di retroazione, ad esempio la somma (o valor medio) delle aperture dei diagrammi ad occhio ("eye opening").

Per il primo dei due canali, lo MSE è il valore atteso del quadrato della differenza tra il valore del segnale ricevuto  $s_1(t_i)$ , nel generico istante di campionamento  $t_i$ , e il corrispondente simbolo trasmesso  $a_{1i}$ :

$$MSE_1 = E \left\{ \left( s_1(t_i) - a_{1i} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

Analogamente, per il secondo canale si ha:

$$MSE_2 = E \left\{ \left( s_2(t_i) - a_{2i} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

Una buona stima delle due grandezze si può ottenere sostituendo, in (12) e (13), i simboli trasmessi  $a_{1i}$  e  $a_{2i}$  con i corrispondenti simboli decisi in ricezione  $\hat{a}_{1i}$  e  $\hat{a}_{2i}$ , e il valore atteso con una media su un numero finito  $M$  di campioni. In tal modo, considerando di prendere il valor medio degli MSE per i due canali, il segnale di retroazione è

$$U(t_i) = \frac{1}{2M} \sum_{k=0}^{M-1} \left[ \left( s_1(t_i - kT_b) - \hat{a}_{1(i-k)} \right)^2 + \left( s_2(t_i - kT_b) - \hat{a}_{2(i-k)} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Considerando un valore di  $M$  sufficientemente grande, nel caso in cui il sistema stia funzionando correttamente e il tasso d'errore sia conseguentemente molto basso,  $U$  è un'ottima approssimazione dello MSE. Nella pratica le operazioni indicate nell'equazione (14) vengono eseguite all'interno del blocco MSE 21 indicato in figura 1, che può essere integrato o meno nel ricevitore, come facilmente immaginabile dal tecnico esperto.

Infine, all'interno del blocco di controllo 20 è vantaggiosamente implementato un algoritmo di minimizzazione basato sul metodo del gradiente. I  $Q$  parametri del DMUX 17 vengono continuamente aggiornati sulla base di tale algoritmo, in modo da mantenere minimo il valore del segnale di retroazione. Per ottenere lo scopo sono altresì impiegabili svariati algoritmi, come facilmente immaginabile dal tecnico, quali l'algoritmo di Newton e suoi derivati, l'algoritmo di Levenberg-Marquardt o



algoritmi stocastici come il "simulated annealing".

I dettagli di un vantaggioso algoritmo impiegabile, il modo in cui viene stimato il gradiente e la legge con cui i parametri vengono aggiornati sono noti dalla domanda di brevetto italiano MI2001A002631 e non saranno qui ulteriormente descritti.

A questo punto è chiaro come si siano raggiunti gli scopi prefissati.

Naturalmente, la descrizione sopra fatta di una realizzazione applicante i principi innovativi della presente invenzione è riportata a titolo esemplificativo di tali principi innovativi e non deve perciò essere presa a limitazione dell'ambito di privativa qui rivendicato.

Sebbene nella descrizione fatta i due segnali  $a_1$  e  $a_2$  siano descritti come segnali fra loro indipendenti, vale a dire realizzanti due comunicazioni di informazioni distinte, essi possono anche essere presi come segnali di decodifica (ad esempio, multilivello) di un segnale da trasmettere. Risulta chiaro al tecnico come in tale caso possano essere impiegati i due segnali  $\hat{a}_1$  e  $\hat{a}_2$  ricevuti per ottenere la decodifica inversa e riottenere il segnale trasmesso.

Le equazioni (10) e (11) sono indicative del fatto che la presente invenzione può essere utilizzata per svariati formati di modulazione alternativi. Prescindendo dal formato di modulazione utilizzato, i vettori definiti in (7) possono essere considerati, rispettivamente, la rappresentazione di Jones del campo all'ingresso della fibra, la rappresentazione di Jones del corrispondente campo all'uscita della fibra e la rappresentazione di Jones del campo all'uscita del DMUX, immaginando di considerare, dal punto di vista formale, i segnali sulle due uscite del DMUX come le due polarizzazioni ortogonali di un medesimo campo.

Nel caso, precedentemente illustrato, in cui l'apparato DMUX 17 viene realizzato mediante una successione di PC e PMF, tale artificio formale non è necessario,



essendo le due uscite del dispositivo effettivamente costituite dalle due polarizzazioni del segnale.

A causa dei fenomeni già descritti in precedenza, le distorsioni presenti sul campo all'uscita della fibra possono essere tali da non consentire una corretta decodifica del formato di modulazione utilizzato. L'utilizzo della presente invenzione, consentendo di invertire la matrice di trasferimento della fibra, consente sostanzialmente di eliminare gli effetti dannosi del canale, restituendo in uscita un segnale approssimativamente identico a quello trasmesso, anche dal punto di vista dello stato di polarizzazione. In tal modo il segnale può essere correttamente decodificato.

Un esempio pratico di quanto sopra menzionato è ad esempio costituito dalla modulazione dello stato di polarizzazione del segnale (conosciuta come modulazione PolSK multilivello). Con un tale tipo di modulazione la PMD o anche una semplice rotazione di polarizzazione sono fortemente deleteri come nel caso PolMUX. Utilizzando la presente invenzione è possibile compensare gli effetti tanto della rotazione della polarizzazione che della PMD, filtrando il segnale all'uscita della fibra secondo il medesimo schema indicato per la PolMUX ed inviando le due uscite del DMUX ad un ricevitore per il formato PolSK, quale ad esempio un noto ricevitore a parametri di Stokes.

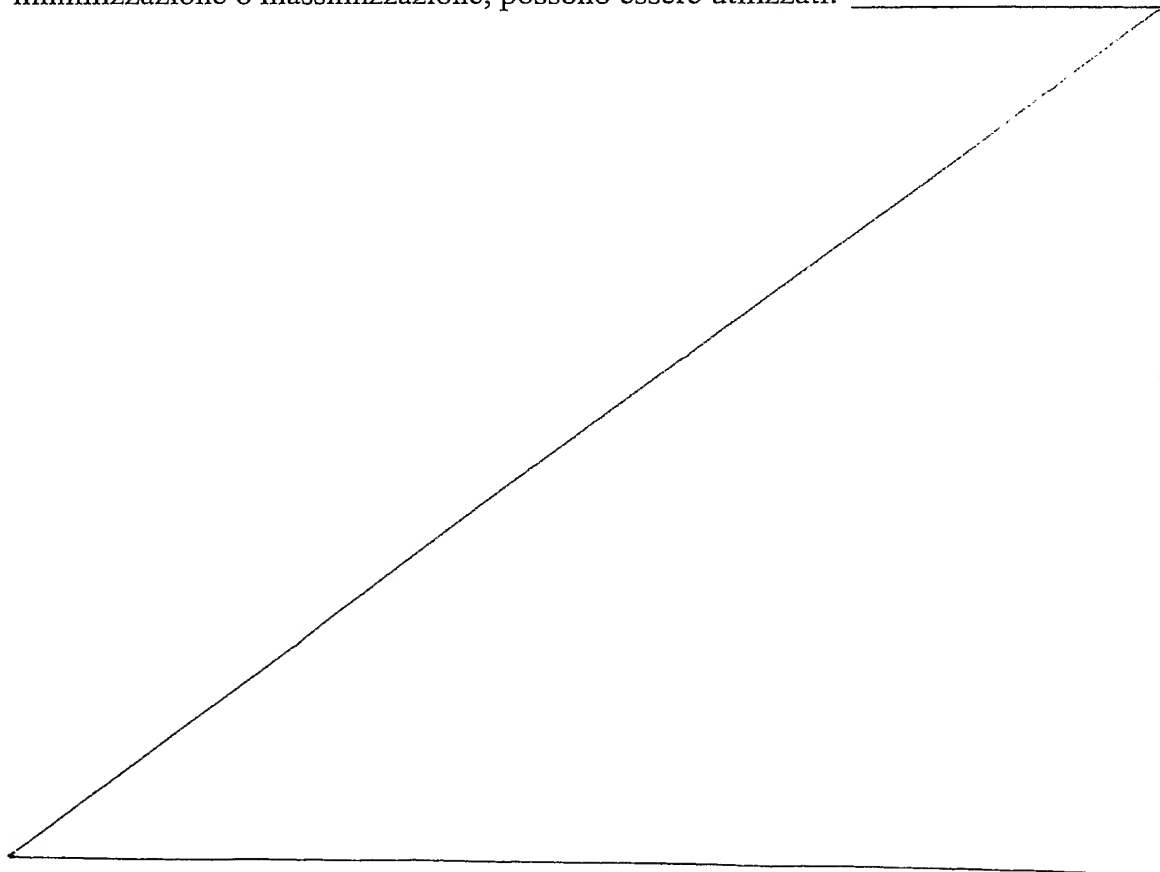
In questo caso il segnale di retroazione è una stima dello MSE, mediata su tutti i canali associati alla modulazione. Ad esempio, considerando una modulazione PolSK ad otto livelli, si associano tre diversi canali ai tre parametri di Stokes del segnale ottico. Lo MSE viene quindi stimato per ognuno dei tre canali ricevuti e mediato su di essi.

Si consideri anche che sebbene si sia trovato vantaggioso l'impiego di un dispositivo realizzato mediante circuiti ottici planari, un qualunque altro dispositivo o insieme di

dispositivi rappresentabili con un analogo schema a blocchi, o in grado di riprodurre la medesima matrice di trasferimento, può essere proficuamente impiegato.

Un esempio pratico può essere costituito da un dispositivo realizzato con controllori di polarizzazione e fibre a mantenimento, quale quello descritto nella sopra menzionata domanda MI2001A002631, adeguatamente seguito da un ulteriore controllore di polarizzazione e divisore di polarizzazione, come facilmente immaginabile dal tecnico alla luce delle spiegazioni qui date.

Come sopra menzionato, per il controllo dinamico del dispositivo stesso, nella presente invenzione si fa vantaggiosamente riferimento ad un particolare segnale di retroazione, l'errore quadratico medio, e ad un particolare algoritmo di minimizzazione, l'algoritmo del gradiente. Un altro segnale di retroazione in grado di monitorare la qualità dei due canali ricevuti, nonché un altro algoritmo di minimizzazione o massimizzazione, possono essere utilizzati.



## RIVENDICAZIONI

1. Sistema di trasmissione comprendente due segnali ottici che vengono trasmessi lungo una stessa fibra a stessa lunghezza d'onda ma con polarizzazione ortogonale, comprendente un apparato ricevente in grado di filtrare le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una matrice di trasferimento  $H(\omega)$  che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.
2. Sistema secondo rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che la matrice di trasferimento  $H(\omega)$  è:

$$H(\omega) = e^{-j\frac{N}{2}\omega\tau} \begin{pmatrix} C(\omega) & D(\omega) \\ -D(\omega)^* & C(\omega)^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

con le due funzioni  $C(\omega)$  e  $D(\omega)$  che possono essere rappresentate come:

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^N c_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (2)$$

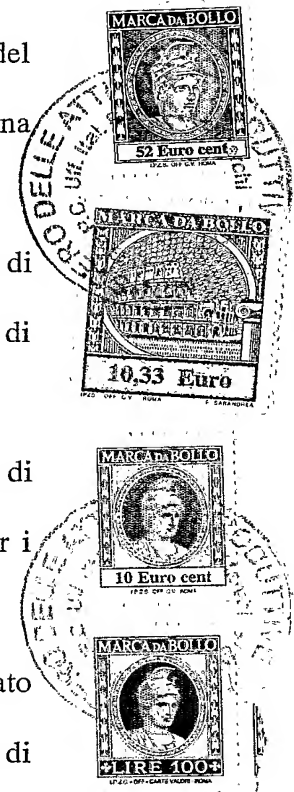
$$D(\omega) = \sum_{k=0}^N d_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (3)$$

con

$$|C(\omega)|^2 + |D(\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

dove  $\tau$  è un opportuno ritardo temporale e  $c_0 \dots c_N$  e  $d_0 \dots d_N$  sono i coefficienti complessi controllati dinamicamente sulla base dei segnali in uscita.

3. Sistema secondo rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che l'apparato ricevente comprende in ingresso uno splitter di polarizzazione che divide il segnale ricevuto in due componenti in base alla polarizzazione e un dispositivo DMUX a quattro porte che filtra le due componenti approssimando la matrice di trasferimento inversa della fibra.
4. Sistema secondo rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che le componenti filtrate sono applicate a mezzi di fotorilevazione e i segnali ottenuti dalla fotorilevazione sono inviati a circuiti (RX) di recupero del clock e dei dati.
5. Sistema secondo rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che i parametri del dispositivo DMUX sono controllati dinamicamente per minimizzare una stabilità funzione di costo.
6. Sistema secondo rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che la funzione di costo è funzione della somma degli errori quadratici medi per i due segnali di uscita.
7. Sistema secondo rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che la funzione di costo è funzione della somma delle aperture dei diagrammi ad occhio per i due segnali di uscita.
8. Sistema secondo rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che l'apparato DMUX è realizzato mediante un dispositivo PLC e comprende una cascata di  $N$  elementi identici, ognuno comprendente una struttura interferometrica (21) con ritardo  $\tau$  tra i due cammini ottici, un modulatore di fase (22) controllato dal parametro  $\phi_n$  e un accoppiatore variabile (23) controllato dal parametro  $\theta_n$ .
9. Sistema secondo rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che all'ingresso del dispositivo è presente un ulteriore accoppiatore variabile  $\theta_n$ .



10. Sistema secondo rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che alcuni o tutti gli  $N$  elementi del dispositivo sono costituiti da un numero maggiore di modulatori di fase (22) e accoppiatori variabili (23).

11. Sistema secondo rivendicazione 8 caratterizzato dal fatto che la matrice di trasferimento complessiva del dispositivo è

$$H(\omega) = \left[ \prod_{n=N}^1 (H_{\theta n} H_{\phi n} H_{\tau}(\omega)) \right] H_{\theta 0} \quad (6)$$

12. Sistema secondo rivendicazione 11, caratterizzato dal fatto che la matrice (6) è una matrice di trasferimento unitaria dipendente dalla frequenza e può essere scritta nella forma

$$H(\omega) = e^{-j\frac{N}{2}\omega\tau} \begin{pmatrix} C(\omega) & D(\omega) \\ -D(\omega)^* & C(\omega)^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$|C(\omega)|^2 + |D(\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

con le due funzioni  $C(\omega)$  e  $D(\omega)$  che possono essere rappresentate mediante la loro espansione in serie di Fourier ( $N+1$  termini)

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^N c_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (2)$$

$$D(\omega) = \sum_{k=0}^N d_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (3)$$

dove  $c_k$  e  $d_k$  sono dei coefficienti complessi legati non linearmente ai parametri reali di controllo del dispositivo.

13. Sistema secondo rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che il dispositivo comprende una cascata di controllori di polarizzazione (PC) e fibre a mantenimento di polarizzazione (PMF).

14. Apparato per ricevere un segnale ottico, che è stato trasmesso lungo una fibra e che è composto da due segnali multiplati in polarizzazione, e per eseguire

una compensazione della PMD e la contemporanea demultiplazione dei due segnali, comprendente mezzi che filtrano le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una matrice di trasferimento  $H(\omega)$  che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.

15. Apparato secondo rivendicazione 14, caratterizzato dal fatto che la matrice di trasferimento  $H(\omega)$  è:

$$H(\omega) = e^{-j\frac{N}{2}\omega\tau} \begin{pmatrix} C(\omega) & D(\omega) \\ -D(\omega)^* & C(\omega)^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

con le due funzioni  $C(\omega)$  e  $D(\omega)$  che possono essere rappresentate come:

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^N c_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (2)$$

$$D(\omega) = \sum_{k=0}^N d_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (3)$$

con

$$|C(\omega)|^2 + |D(\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

dove  $\tau$  è un opportuno ritardo temporale e  $c_0 \dots c_N$  e  $d_0 \dots d_N$  sono i coefficienti complessi controllati dinamicamente sulla base dei segnali in uscita.

16. Apparato ricevente secondo rivendicazione 14, caratterizzato dal fatto che comprende in ingresso uno splitter di polarizzazione che divide il segnale ricevuto in due componenti in base alla polarizzazione e un dispositivo

DMUX a quattro porte che filtra le due componenti approssimando la matrice di trasferimento inversa della fibra.

17. Apparato ricevente secondo rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che le componenti filtrate sono applicate a mezzi di fotorilevazione e i segnali ottenuti dalla fotorilevazione sono inviati a circuiti (RX) di recupero del clock e dei dati.
18. Apparato ricevente secondo rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che i parametri del dispositivo DMUX sono controllati dinamicamente per minimizzare una stabilita funzione di costo.
19. Apparato ricevente secondo rivendicazione 18, caratterizzato dal fatto che la funzione di costo è funzione della somma degli errori quadratici medi per i due segnali di uscita.
20. Apparato ricevente secondo rivendicazione 18, caratterizzato dal fatto che la funzione di costo è funzione della somma delle aperture dei diagrammi ad occhio per i due segnali di uscita.
21. Apparato ricevente secondo rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che l'apparato DMUX è realizzato mediante un dispositivo PLC e comprende una cascata di  $N$  elementi identici, ognuno comprendente una struttura interferometrica (21) con ritardo  $\tau$  tra i due cammini ottici, un modulatore di fase (22) controllato dal parametro  $\phi_n$  e un accoppiatore variabile (23) controllato dal parametro  $\theta_n$ .
22. Apparato ricevente secondo rivendicazione 21, caratterizzato dal fatto che all'ingresso del dispositivo è presente un ulteriore accoppiatore variabile  $\theta_n$ .
23. Apparato ricevente secondo rivendicazione 21, caratterizzato dal fatto che alcuni o tutti gli  $N$  elementi del dispositivo sono costituiti da un numero



maggiore di modulatori di fase (22) e accoppiatori variabili (23).

24. Apparato ricevente secondo rivendicazione 21 caratterizzato dal fatto che la matrice di trasferimento complessiva del dispositivo è

$$H(\omega) = \left[ \prod_{n=N}^1 (H_{\theta n} H_{\phi n} H_{\tau}(\omega)) \right] H_{\theta 0} \quad (6)$$

25. Apparato ricevente secondo rivendicazione 24, caratterizzato dal fatto che la matrice (6) è una matrice di trasferimento unitaria dipendente dalla frequenza e può essere scritta nella forma

$$H(\omega) = e^{-j\frac{N}{2}\omega\tau} \begin{pmatrix} C(\omega) & D(\omega) \\ -D(\omega)^* & C(\omega)^* \end{pmatrix}$$

$$|C(\omega)|^2 + |D(\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

con le due funzioni  $C(\omega)$  e  $D(\omega)$  che possono essere rappresentate mediante la loro espansione in serie di Fourier (N+1 termini)

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^N c_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (2)$$

$$D(\omega) = \sum_{k=0}^N d_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (3)$$

dove  $c_k$  e  $d_k$  sono dei coefficienti complessi legati non linearmente ai parametri reali di controllo del dispositivo.

26. Apparato ricevente secondo rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che il dispositivo comprende una cascata di controllori di polarizzazione (PC) e fibre a mantenimento di polarizzazione (PMF).
27. Metodo di trasmissione comprendente due segnali ottici che vengono trasmessi lungo una stessa fibra a stessa lunghezza d'onda ma con polarizzazione ortogonale, e che al lato ricevente filtra le due componenti con polarizzazione ortogonale del segnale ricevuto secondo una matrice di



trasferimento  $H(\omega)$  che è controllata dinamicamente sulla base dei segnali in uscita, in modo da approssimare la matrice di trasferimento inversa della fibra nella regione dello spettro occupata dal segnale, così da compensare la PMD e la rotazione di polarizzazione introdotte dalla fibra, eliminando effetti di distorsione e mutua interferenza per entrambi i segnali e ottenendo in uscita una replica approssimata dei due segnali trasmessi.

28. Metodo secondo rivendicazione 27, caratterizzato dal fatto che la matrice di trasferimento  $H(\omega)$  è:

$$H(\omega) = e^{-j\frac{N}{2}\omega\tau} \begin{pmatrix} C(\omega) & D(\omega) \\ -D(\omega)^* & C(\omega)^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

con le due funzioni  $C(\omega)$  e  $D(\omega)$  che possono essere rappresentate come:

$$C(\omega) = \sum_{k=0}^N c_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (2)$$

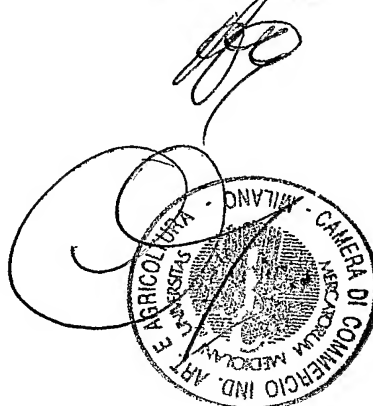
$$D(\omega) = \sum_{k=0}^N d_k e^{-j(k-N/2)\omega\tau} \quad (3)$$

con

$$|C(\omega)|^2 + |D(\omega)|^2 = 1 \quad (4)$$

dove  $\tau$  è un opportuno ritardo temporale e  $c_0 \dots c_N$  e  $d_0 \dots d_N$  sono i coefficienti complessi controllati dinamicamente sulla base dei segnali in uscita.

mandatari



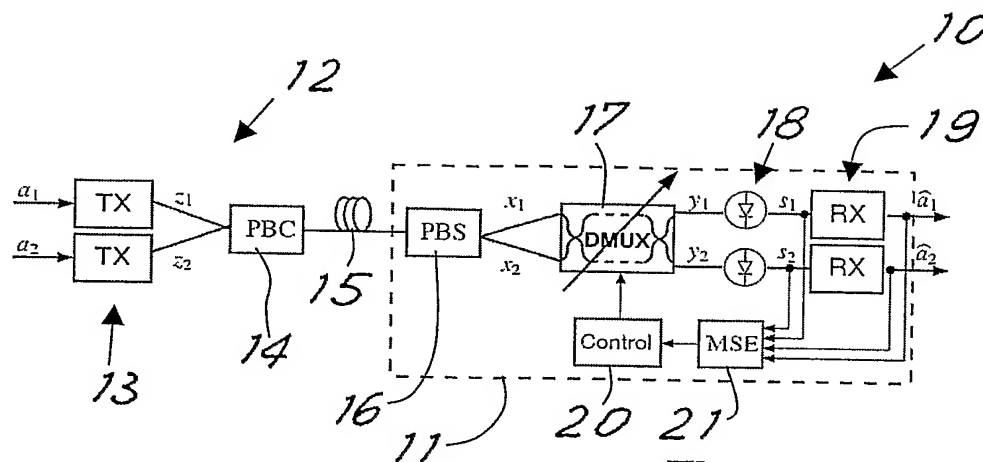


Fig. 1

MI 2004 A 0 0 0 4 4 6

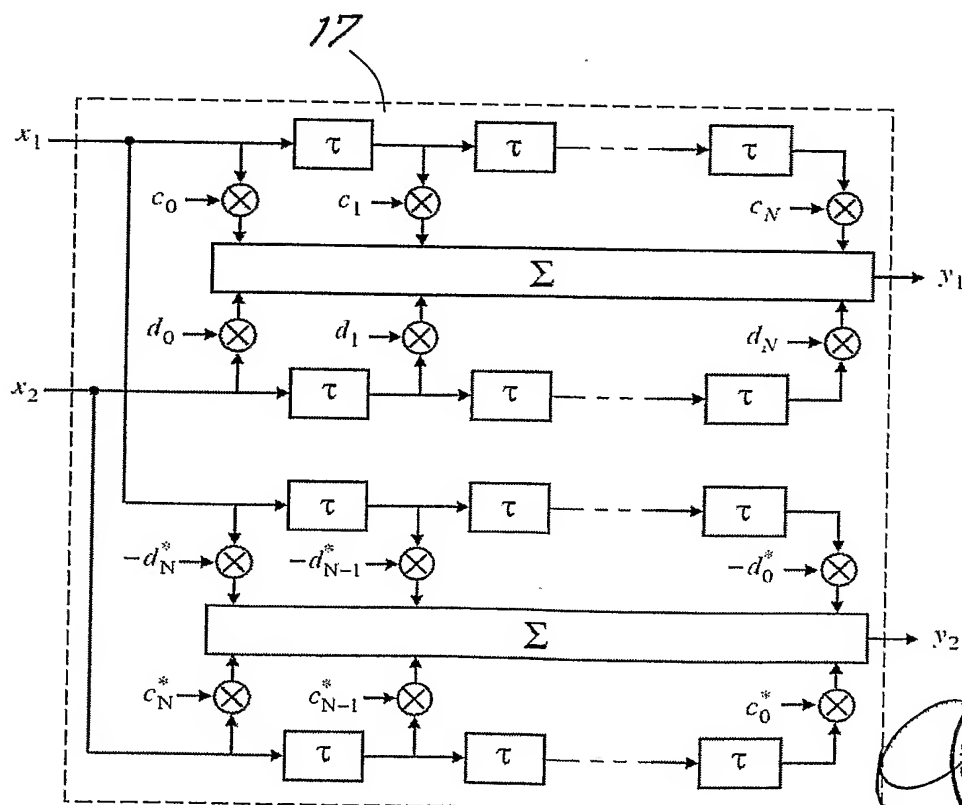


Fig. 2

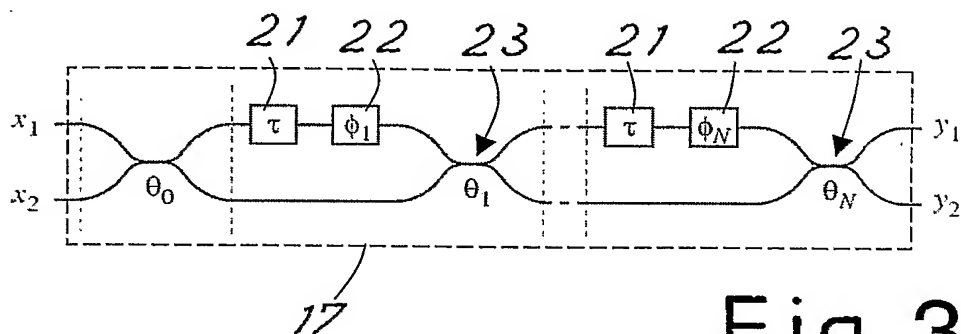


Fig. 3

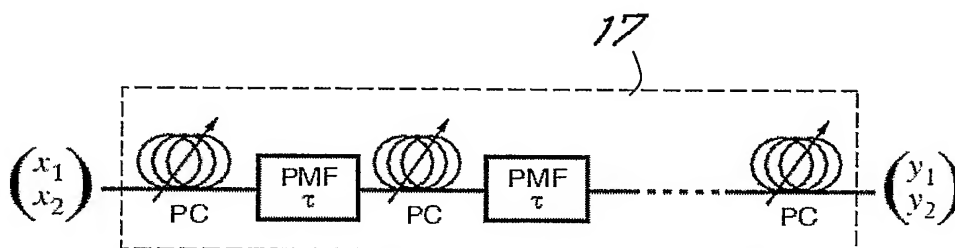


Fig. 4

MI 2004 A 0 0 0 4 4 6

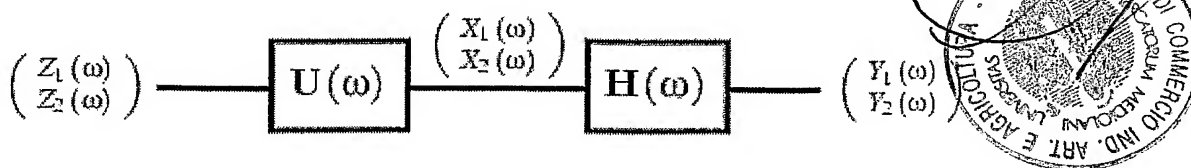


Fig. 5

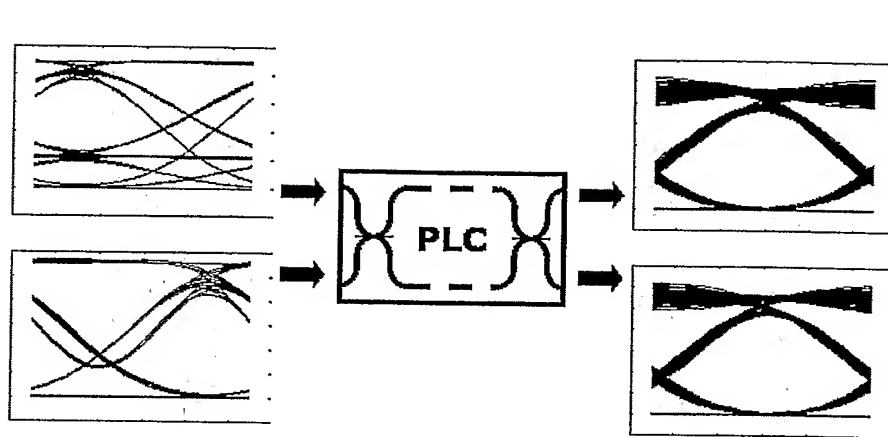


Fig. 6

MI 2004 A0 00446

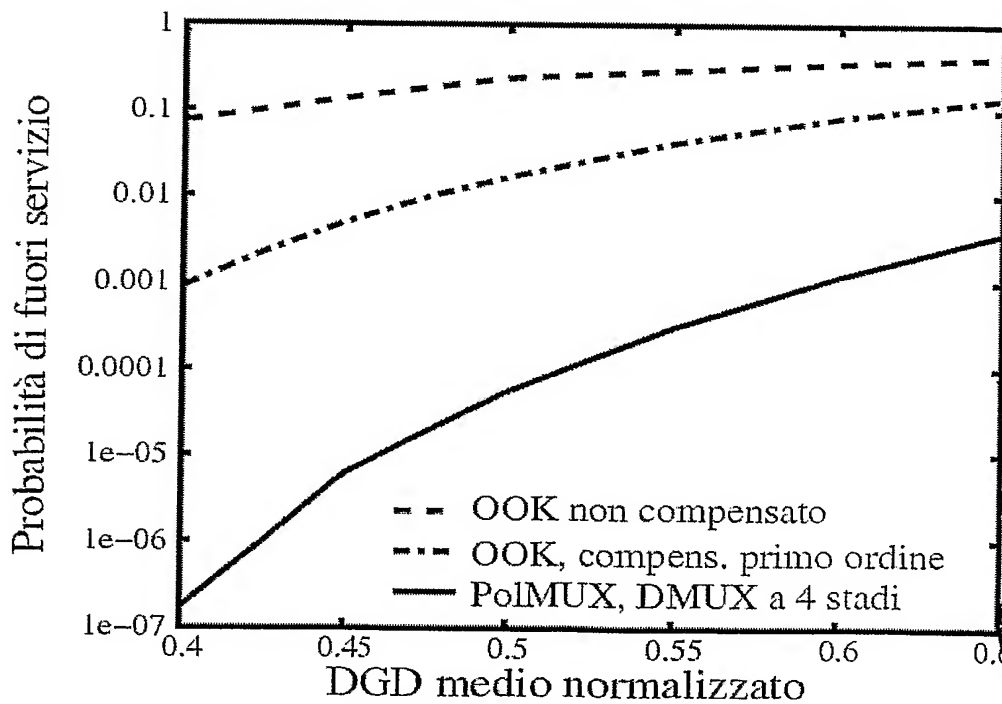


Fig. 7

